

① RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

⑪ N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 756 044**

⑫ N° d'enregistrement national : **96 14124**

⑬ Int Cl<sup>6</sup> : G 01 N 33/00, G 01 N 33/26, 11/00, F 17 D 3/05, 3/18,  
G 01 F 22/00

⑭

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

**A1**

⑮ Date de dépôt : 18.11.96.

⑯ Priorité :

⑰ Demandeur(s) : INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE  
— FR.

⑲ Date de la mise à disposition du public de la  
demande : 22.05.98 Bulletin 98/21.

⑳ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule.*

㉑ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑳ Inventeur(s) : HENRIOT VERONIQUE, DUCHET  
SUCHAUX PIERRE, LEBOVICI CLAUDE, FAILLE  
ISABELLE et HEINTZE ERIC.

㉒ Titulaire(s) :

㉓ Mandataire :

① METHODE POUR CONSTITUER UN MODELE REPRESENTATIF D'ECOULEMENTS POLYPHASIQUES DANS  
DES CONDUITES DE PRODUCTION PETROLIERE.

② La méthode proposée a pour objet de constituer un  
modèle représentatif des écoulements permanents et transi-  
toires dans des conduites d'un mélange de fluides poly-  
phasiques, qui prend en compte un ensemble de variables  
définissant les propriétés des fluides et des modes d'écou-  
lement: à phases séparées, dispersés, intermittents, et  
aussi des dimensions et pentes des conduites d'acheminement.  
On détermine les grandeurs caractérisant l'écoulement  
en résolvant un ensemble d'équations de transport,  
une équation de conservation de masse par constituant et  
une équation de quantité de mouvement du mélange, et en  
utilisant un module hydrodynamique et une caractéristique  
thermodynamique des fluides. On forme le modèle en  
considérant que le mélange est sensiblement à l'équilibre à  
chaque instant et que la composition du mélange polypha-  
sique est variable tout le long de la conduite.

Application à l'étude de réseau d'acheminement d'hydro-  
carbures par exemple.

FR 2 756 044 - A1



La présente invention concerne une méthode pour constituer un modèle représentatif des écoulements stationnaires et transitoires dans des conduites d'un mélange de fluides polyphasiques.

5        La modélisation réalisée par la méthode selon l'invention, permet de tenir compte des phénomènes de transfert de masse entre phases et de quantités de mouvement entre les phases du mélange, à partir d'un ensemble de variables définissant les propriétés des fluides, leurs modes d'écoulement et aussi des variations de la pente des conduites par rapport à l'horizontale. Le modèle ainsi  
10        constitué permet de faciliter la conception de réseaux de transfert d'effluents pétroliers par exemple.

La méthode selon l'invention convient notamment pour modéliser le comportement de mélanges polyphasiques d'hydrocarbures circulant dans des pipelines depuis des sites d'exploitation de gisements jusqu'à des sites de chargement  
15        ou de traitement par exemple.

Il est bien connu des spécialistes que les modes d'écoulement de fluides polyphasiques dans des tubes sont extrêmement variés et complexes. Les écoulements diphasiques, par exemple, peuvent être stratifiés, la phase liquide s'écoulant dans la partie inférieure de la conduite, ou intermittents avec une  
20        succession de bouchons liquides et gazeux, ou bien encore dispersés, le liquide étant entraîné sous forme de fines gouttelettes. Le mode d'écoulement varie notamment avec l'inclinaison des conduites par rapport à l'horizontale et il dépend du débit de la phase gazeuse, de la température etc. Le glissement entre les phases qui varie selon que l'on considère les tronçons ascendants ou descendants, entraîne des variations de  
25        pression sans qu'il y ait toujours compensation. Les caractéristiques du réseau d'écoulement (dimensionnement, pression, débit de gaz etc.) doivent être déterminées avec soin.

Parmi les nombreuses publications portant sur le comportement des écoulements notamment diphasiques dans des conduites, on peut citer par exemple :

- Fabre, J., et al 1983, Intermittent gas-liquid flow in horizontal or slightly inclined pipes, Int. Conference on the Physical Modelling of Multi-Phase Flow, Coventry, England, pp 233, 254; ou
- Fabre, J., et al 1989, Two fluid/two flow pattern model for transient gas liquid  
5 flow in pipes, Int. Conference on Multi-Phase Flow, Nice, France, pp 269, 284, Cranfield, BHRA.

Une méthode de modélisation existe où l'on traite les changements de phase par des processus itératifs : l'état du mélange est censé connu a priori et, si cela conduit, à des incohérences, après calcul hydrodynamique, les calculs sont répétés  
10 avec un nouvel état du mélange. Cette méthode est lourde et peut être la source de problèmes de convergence.

Une méthode de modélisation appliquée à des milieux poreux est décrite par exemple par Eymard R., Gallouët T., 1991, Traitement des changements de phases, dans la modélisation de gisements pétroliers. *Journées numériques de Besançon*, 23  
15 et 24 septembre 1991.

Par le brevet US 5 550 761 du demandeur, on connaît une méthode de modélisation des écoulements polyphasiques permanents ou transitoires qui prend en compte un ensemble de variables définissant les propriétés des fluides et des modes d'écoulement, et aussi des dimensions et pentes des conduites d'acheminement. On  
20 détermine les grandeurs caractérisant l'écoulement en résolvant un ensemble d'équations de transport avec une équation de conservation par phase et une équation de quantité de mouvement du mélange, et en utilisant un modèle hydrodynamique et une caractéristique thermodynamique des fluides.

Pour obtenir ce modèle hydrodynamique, on caractérise les régimes  
25 d'écoulement par un paramètre variant entre 0 et 1 représentatif de la fraction de l'écoulement qui est dans un état séparé (les phases sont stratifiées verticalement ou radialement par exemple), on détermine tout régime d'écoulement au cours de la résolution des équations de transport, par une comparaison de la valeur courante de la fraction liquide dans les bouchons et de celle des régions à mode d'écoulement  
30 dispersé, on détermine aussi la vitesse des bouchons de la phase gazeuse par rapport

à une vitesse critique, et on impose durant la résolution des relations de fermeture, des contraintes de continuité aux frontières entre les régimes, aux fractions de volume gazeux ainsi qu'à la vitesse de déplacement des bouchons.

Dans la méthode précédente, on a choisi une approche "par phase" (liquide-gaz) où la conservation de la masse est traduite par une équation de conservation par phase et le transfert de masse entre phases est exprimé par un terme de déséquilibre proportionnel à l'écart entre deux valeurs de fraction massique vapeur, l'une  $fmva_{eq}$ , correspondant à l'équilibre, qui est fournie par la thermodynamique à composition globale constante, l'autre étant celle calculée en tenant compte du glissement entre phases :

$$m_G = AKGL \cdot \left( fmva_{eq} - \frac{\rho_G \cdot R_G \cdot V_G}{\rho_G \cdot R_G \cdot V_G + \rho_L \cdot R_L \cdot V_L} \right)$$

où AGKL est un facteur dépendant a priori du fluide et de la configuration de l'écoulement.

On a constaté à l'usage qu'il est difficile de définir une formulation de ce terme de déséquilibre, qui s'applique à toutes les situations: pentes locales des conduites avec des points hauts et des points bas, importants transferts de masse entre phases. Il n'existe pas de méthode fiable et robuste permettant de prendre correctement en compte le terme de déséquilibre entre les phases; l'approche liquide-gaz ou "par phase" ne donne pas de résultats satisfaisants pour traiter les cas où se produisent d'importants transferts entre phases.

Pour constituer un modèle représentatif des écoulements permanents et transitoires dans des conduites d'un mélange polyphasique, qui prend en compte un ensemble de variables définissant les propriétés des fluides et des modes d'écoulement: à phases séparées, dispersés, intermittents, et aussi des dimensions et pentes des conduites d'acheminement, la méthode selon l'invention comporte l'utilisation d'un modèle hydrodynamique de type à flux de dérive et d'un modèle thermodynamique pour définir les propriétés des constituants et la résolution d'un ensemble d'équations de conservation de la masse par constituant, de conservation de la quantité de mouvement du mélange et de transfert d'énergie dans le mélange.

La méthode selon l'invention est caractérisée en ce que l'on forme le modèle en considérant que le mélange est sensiblement à l'équilibre à chaque instant et que la composition du mélange polyphasique est variable tout le long de la conduite, la masse de chaque constituant du mélange étant définie globalement par une équation de conservation de la masse sans considération de son état de phase, et en ce que l'on utilise par exemple un schéma numérique explicite en temps de façon à faciliter la résolution des équations du modèle.

Le traitement de l'apparition et la disparition des phases est rendu plus simple par cette approche compositionnelle car la masse de chaque constituant y est considérée globalement sans tenir compte de son état de phase (monophasique ou polyphasique). On évite ainsi les difficultés liées à l'approche "par phase" précédente où il y a une équation de conservation par phase et où donc le nombre d'équations de conservation de masse varie à chaque changement d'état des constituants selon qu'une phase apparaît ou disparaît.

La méthode proposée permet de traiter facilement les phénomènes d'apparition et de disparition de phases sans rencontrer les problèmes de convergence des solutions qui se produisent parfois avec les méthodes existantes ce qui assure la robustesse du code.

Suivant un mode de mise en œuvre, la méthode comporte une résolution des équations de transfert d'énergie découplée de celle concernant la conservation de la masse et la quantité de mouvement.

La méthode permet une résolution des équations de transfert d'énergie, découplée de celle concernant la conservation de la masse et la quantité de mouvement et elle comporte de préférence l'utilisation d'un schéma numérique explicite en temps, avec cette conséquence très utile que les masses de chacun des constituants sont le résultat du schéma numérique sans aucun appel itératif au modèle hydrodynamique. Connaissant les masses des constituants et la température, le modèle thermodynamique intégré détermine la pression et la composition du mélange et notamment la fraction volumique des phases. La détection de l'apparition et de la disparition des phases est ainsi rendue plus robuste.

Avec ce découplage permis par la méthode, on évite ainsi d'avoir à résoudre simultanément le modèle thermodynamique et le modèle hydrodynamique. Par là, on évite les conflits qui peuvent naître du fait que les solutions que fournissent respectivement ces modèles sont a priori d'égale pertinence, et difficiles à accorder les unes avec les autres. Il en résulte que la détection des phénomènes d'apparition et de disparition des phases est simple et robuste.

Suivant un mode de mise en oeuvre, la méthode comporte l'assimilation d'un mélange multi-composants tel qu'un fluide pétrolier s'écoulant dans des conduites, à un mélange comportant un nombre plus réduit de composants et par exemple à un mélange binaire équivalent (à deux constituants) ayant sensiblement la même enveloppe de phase que le mélange réel, de façon à rendre moins coûteux l'établissement du modèle compositionnel.

La méthode comporte avantageusement l'utilisation d'un module intégré de détermination des paramètres thermodynamiques (équilibre de phase et propriétés de transport) qui donne des résultats plus représentatifs que ceux tirés de tables précalculées.

D'autres caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après de modes de réalisation décrits à titre d'exemples non limitatifs, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 présente les conditions aux limites prises en compte;
- la Fig. 2 illustre le mode de calcul stationnaire approché dans le cas où la température est connue;
- la Fig.3 présente l'algorithme général du calcul stationnaire dans le cas où le calcul de la température est demandé;
- la Fig.4 présente l'algorithme de détermination de la pression connaissant les masses des constituants en utilisant un flash à pression et températures imposées;
- la Fig.5 montre l'algorithme de détermination de la pression connaissant les masses des constituants en utilisant un flash à volumes et températures imposés;

- la Fig.6 présente l'algorithme de calcul permettant de déterminer les grandeurs caractérisant l'écoulement à partir des grandeurs conservatives fournies par le schéma numérique lors du calcul transitoire; et
- la Fig.7 présente l'algorithme de résolution de l'équation de transferts thermiques.

## 5 I) Inconnues et équations

La réalisation du modèle n composants, p phases, comporte la résolution d'équations de conservation de la masse pour chacun des constituants, de conservation de la quantité de mouvement du mélange et de l'énergie du mélange, que l'on va définir ci-après, en notant comme suit les différents paramètres :

- 10 I.1) Inconnues:
- $x_j^i$ : fraction massique du composant i dans la phase j
- $c_i$  : fraction massique totale du composant i
- $R_j$ : fraction volumique de la phase j
- $V_j$ : vitesse de la phase j (m/s)
- 15  $P$  : pression (Pa)
- $T$  : température (K)
- $H_j$ : enthalpie massique de la phase j
- $\rho_j$ : masse volumique de la phase j ( $kg/m^3$ )
- $T_w$ : frottement à la paroi ( $Pa/m$ )
- 20  $Q_w$ : terme d'échange de chaleur à la paroi ( $W/m^3$ )
- $\theta$  : angle de la conduite avec l'horizontale
- $V_M = \frac{\sum \rho_j R_j V_j}{\sum \rho_j R_j}$ : vitesse barycentrique du mélange (m/s)
- $\rho = \sum \rho_j R_j$  masse volumique moyenne du mélange. ( $kg/m^3$ )
- $X_j = \frac{\rho_j R_j}{\rho}$ : fraction massique de la phase j
- 25  $g$  : accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )
- $S$  : surface de passage du fluide ( $m^2$ )
- $W$  : variables conservatives
- $F$  : flux du schéma numérique
- $Q$  : termes sources

- Dans l'approche compositionnelle selon l'invention, la conservation de la masse est vérifiée pour chacun des constituants. Le transfert de masse entre phases n'apparaît pas explicitement dans ces équations mais il intervient par le fait que l'on décrit le fluide comme un mélange de composition variable le long de la conduite.
- 5 Le mélange est supposé être à l'équilibre à chaque instant.

### I.2) Définitions :

On désignera dans la suite de la description de façon abrégée par :

- "flash" un sous-programme intégré de calcul des propriétés thermodynamiques (équilibre liquide-vapeur, composition de chacune des phases) à l'aide d'une
- 10 équation d'état;
- "flash (P, T)", un "flash" réalisé en connaissant la composition globale du mélange, la pression et la température;
- "flash (T, V)", un "flash" réalisé en connaissant la composition globale du mélange, la température et la masse de chacun des constituants avec une
- 15 détermination de la pression au cours du calcul, de façon que les masses soient vérifiées;
- "flash (P, H)", un "flash" réalisé en connaissant la composition globale du mélange, la pression et l'enthalpie totale, avec une détermination de la température au cours du calcul, de façon que l'enthalpie soit vérifiée.

### 20 I.3) Équations

Les équations de conservation traitées sont les suivantes :

- une équation de conservation de la masse pour chaque constituant i :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\sum \rho_j R_j x_j^i) + \frac{\partial}{\partial x}(\sum \rho_j R_j x_j^i V_j) = 0$$

- une équation de conservation de quantité de mouvement du mélange :

$$25 \quad \frac{\partial}{\partial t}(\sum \rho_j R_j V_j) + \frac{\partial}{\partial x}(\sum \rho_j R_j V_j^2 + P) = T_w - (\sum \rho_j R_j) g \cdot \sin \theta$$

- une équation d'énergie du mélange :



$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_j \rho_j R_j H_j \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \sum_j \rho_j R_j V_j H_j \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \sum_j R_j V_j \right) \frac{\partial p}{\partial x} + Q_w + V_M T_w$$

où  $Q_w$  est le terme de flux d'énergie à la paroi.

Pour tenir compte de l'approche compositionnelle choisie, on impose en plus que :

$$5 \quad \sum_{i=1}^n x_j^i = 1 \quad \forall j$$

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^P \rho_j R_j x_j^i}{\sum_{j=1}^P \rho_j R_j}$$

$$\sum_{j=1}^P R_j = 1$$

Comme conditions aux limites, on peut imposer par exemple à l'amont les débits massiques de chaque constituant et la température, et à l'aval, la pression.

## 10 Comportement thermodynamique du mélange

Par application des lois de la thermodynamique, on obtient les propriétés physiques du fluide nécessaires au code compositionnel.

Pour une pression, une température et une composition globale données, la thermodynamique permet de connaître les fractions massiques de chacun des composants dans chacune des phases. En supplément, elle calcule la masse volumique de chacune des phases présentes et elle permet de déduire les taux volumiques de chacune des phases dans le mélange global et ainsi de détecter si le mélange est diphasique, monophasique liquide ou monophasique gaz. Des lois élémentaires qui seront définies plus loin permettent le calcul des propriétés de transport de chacune des phases : viscosité, conductivité thermique, chaleur spécifique, enthalpie massique, ainsi que la tension interfaciale.

La loi thermodynamique globale (calcul de l'équilibre et des propriétés du mélange) est notée :

$$\left( \begin{array}{c} x_j^i \quad i = 1, n \\ \quad j = 1, p \\ \text{propriétés de transport} \\ \text{propriétés thermiques} \end{array} \right) = \Gamma_{thermo}(P, T, c_1, \dots, c_{n-p+1})$$

### Loi hydrodynamique

- 5 Dans le cas d'un mélange, le comportement hydrodynamique est caractérisé par l'importance du glissement entre les phases en présence : c'est-à-dire par l'écart entre les vitesses de la phase gaz et de la phase liquide dans le cas d'un mélange diphasique. Le glissement dépend des propriétés thermodynamiques des fluides, de la fraction massique de gaz, de la vitesse moyenne du mélange. Il est calculé par une
- 10 fonction appelée fonction hydrodynamique qui détermine également la configuration de l'écoulement et les termes de frottement. Cette fonction est notée :

$$\Phi(V_M, X_j, \Gamma_{thermo}, dV_{ij}) = 0$$

$$\text{où } dV_{ij} = V_i - V_j$$

- 15 Pour constituer le modèle physique convenant à un écoulement diphasique, on utilise par exemple les lois de fermetures suivantes bien connues des spécialistes :

- pour le frottement pariétal on utilise les coefficients de frottements de type Churchill en écoulement turbulent et de type Poiseuille en écoulement laminaire ;
- pour le frottement interfacial, on utilise une loi similaire à celle de Andritsos, N. et Hanratty T.J., 1987, Influence of interfacial waves in stratified gas-liquid flows, *AiChe J.*, Vol. 33, pp 444 - 454 ;
- 20 - pour le diamètre des bulles, on utilise une loi du type de celle proposée par Hinze, J.O, 1955, Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes, *AiChe J.*, Vol1, pp 289-295 ;

- pour la fraction volumique de gaz dans les bouchons liquide, on utilise une loi inspirée de Andreussi P. , Bendiksen K., 1989, An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid flow, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 15-2, pp 937-946.

## 5            **Modèle thermique**

Le terme  $Q_w$  dans l'équation des transferts thermiques correspond au terme d'échange dû à la contribution des différents modes de transfert thermiques: la conduction à travers la conduite (la paroi et les isolants), la convection au sein du fluide et l'échange entre le fluide et le milieu environnant (air, sol ou mer). Pour la  
10 convection au sein du fluide, on tient compte de la configuration de l'écoulement.

## **II) Propriétés physiques des fluides**

Pour caractériser les mélanges, on classe leurs grandeurs caractéristiques en trois groupes :

- **Les informations résultant de l'étude de l'équilibre entre les phases:**
  - 15            • L'état du mélange (p-phasique, triphasique, diphasique, monophasique gaz ou monophasique liquide);
  - Les fractions massiques de chacun des composants dans chacune des phases et le taux volumique de chaque phase dans le mélange;
  - Les masses volumiques de chacune des phases.
- 20            • **Les propriétés de transport** (utiles pour la résolution hydrodynamique):
  - Les viscosités de chacune des phases;
  - La tension interfaciale.
- **Les propriétés utiles pour la modélisation des transferts de chaleur:**
  - 25            • Les enthalpies massiques de chaque phase;
  - Les conductivités thermiques dans chaque phase;
  - Les chaleurs spécifiques des phases.

Comme outils pour la modélisation thermodynamique, on peut utiliser :

a) des corrélations: c'est-à-dire des lois simples permettant de représenter quantitativement les phénomènes physiques dont l'avantage est d'être très peu coûteuses en temps de calcul, ou bien

5 b) des propriétés calculées à partir d'un programme thermodynamique complet avec résolution d'une équation d'état: soit par l'intermédiaire d'une table remplie par un traitement préalable, soit par l'appel à un "flash" intégré à chaque fois que l'on a besoin de connaître les caractéristiques du fluide.

### Présentation des corrélations

10 Les propriétés physiques : masses volumiques  $\rho$ , viscosités, et les tensions interfaciales  $\sigma$  sont calculées par les formules algébriques simples. Par exemple dans le cas d'un mélange diphasique gaz-liquide, le gaz aura un comportement proche de celui d'un gaz parfait et l'on utilisera les relations suivantes :

$$\rho_G = \rho_{GNorm} \cdot \frac{P \cdot T_{Norm}}{P_{Norm} \cdot T}$$

$$v_G = v_{GNorm}$$

$$15 \quad \rho_L = \rho_{LNorm} + \frac{P - P_{Norm}}{a_L^2}$$

$$v_L = v_{LNorm}$$

$$\sigma = \sigma_{Norm}$$

20 Les valeurs  $\rho_{GNorm}$ ,  $P_{Norm}$ ,  $T_{Norm}$ ,  $\rho_{LNorm}$ ,  $v_{GNorm}$ ,  $v_{LNorm}$ ,  $a_L^2$ ,  $\sigma_{Norm}$  sont fournies par l'utilisateur, pour chaque simulation, de façon à reproduire au mieux le comportement du fluide modélisé.

### Coefficients d'équilibre

On ne modélise pas directement les fractions massiques de liquide et de gaz de chacun des constituants mais les facteurs d'équilibre  $K_i$ ,  $K_i = \frac{P_i^0}{P}$  pour chacun

des constituants, où  $P^0_i$  est la pression de saturation à température donnée du composant i.

#### Apparition et disparition des phases :

- 5 Pour déterminer l'état du mélange, deux notions interviennent: la pression de bulle et la pression de rosée. A composition donnée, les pressions de bulle et de rosée se calculent facilement. L'état du mélange dépend alors de la valeur de la pression:

le mélange est diphasique si  $P_{rosée} < P < P_{bulle}$

le mélange est monophasique gaz si  $P < P_{rosée}$

10 le mélange est monophasique liquide si  $P > P_{bulle}$

#### Calcul des propriétés à l'issue du flash

- Pour le calcul des propriétés physiques, on utilise par exemple le modèle thermodynamique de Peng-Robinson avec translation de volume, bien connu des spécialistes. Les viscosités sont calculées par la méthode dite de Lohrentz Bray  
15 Clarck, les chaleurs massiques à pression constante et enthalpies, par la méthode dite de Passut et Danner, qui est de forme polynomiale en fonction de la température, et utilise sept coefficients, la tension interfaciale, par la méthode dite des parachors, ces parachors et l'exposant caractéristique étant calculés par la méthode dite de Broseta, toutes méthodes qui sont également bien connues des spécialistes et décrites par  
20 exemple dans les publications suivantes :

- Broseta D., et al., 1995, Parachors in Term of Critical Temperature, Critical Pressure and Acentric Factor, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, USA, 22-25 oct 1995 ;
- Passut C.A., et al., 1972, *I& EC, Process des. dev.*, 11, 543 (1972) ;
- 25 - Péneloux A., et al., 1982, A consistent correction for Redlich-Kwong-Soave volumes, *Fluid Phase Equilibria*, 8 (1982) pp 7-23 Elseviers Science Publishers (Amsterdam) ;

- Peng D.Y., et al., 1976, A new two-constant equation of state. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 15, 59-64 (1976).

### Assimilation à un mélange à nombre réduit de composants

Comme on l'a vu, une caractéristique importante de la méthode selon  
5 l'invention est la possibilité qu'elle offre d'assimiler les mélanges multi-constituants tels que les fluides pétroliers par exemple, à un mélange d'un nombre plus réduit de pseudo-constituants dont les propriétés sont les plus proches possibles de celles du mélange réel, ceci à partir de la description détaillée de la composition d'un mélange complexe, et par exemple à un mélange binaire de deux pseudo-composants.

### 10 Utilisation des tables de propriétés

On utilise de préférence des "flash" intégrés pour ce qui concerne notamment la détermination de la fraction massique vapeur, et surtout si l'on veut traiter des fluides à plus de deux constituants, qui donnent des résultats bien plus représentatifs que des tables de propriétés thermodynamiques pré-remplies à l'aide d'un programme  
15 de calcul sur la base de la description binaire du fluide.

### III) Détermination approchée de l'état stationnaire

Avant toute simulation, on procède à un calcul approché de l'état initial stationnaire. Ce calcul permet, en partant d'une solution proche de l'état initial réel, de réduire le temps de convergence pour atteindre un état stationnaire en accord avec  
20 le schéma numérique.

Pour obtenir cet état, les équations sont résolues en ne considérant pas les termes en dérivées temporelles et en négligeant les termes d'inertie dans l'équation de quantité de mouvement. Les données utilisées sont les conditions aux limites indiquées sur la Fig.1, où T est la température,  $q_1, \dots, q_n$  les débits massiques des  
25 constituants et P est la pression.

On résout le système d'équations suivant :

$$\sum_{j=1}^P \rho_j R_j V_j x_j^i = q^i / S \quad \text{pour } i = 1 \dots n$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = T_w - \left( \sum \rho_j R_j \right) \cdot g \sin \theta$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \sum \rho_j R_j H_j V_j = \sum (R_j V_j) \cdot \frac{\partial P}{\partial x} - Q_w + V_M T_w$$

$$\Phi(V_M, x_i, \Gamma(P, T, c_i, \dots, c_{n-p+1}), dV) = 0$$

$$\begin{pmatrix} x_j^i \\ \text{propriétés de transport} \\ \text{propriétés thermiques} \end{pmatrix} = \Gamma_{thermo}(P, T, c_1, \dots, c_{n-p+1})$$

5 Les inconnues de ce problème ainsi posé sont :  $P, T, c_1, \dots, c_{n-p+1}, R_j, dV_j, V_j$ .

La démarche suivie consiste à effectuer un premier calcul de l'aval vers l'amont, qui permet de déterminer la pression à l'amont pour un profil de température imposé. Seuls les calculs de l'hydrodynamique et de la thermodynamique sont effectués. En partant de l'aval (Fig.2), la pression est imposée, les débits sont connus  
 10 (égaux à ceux de l'amont), la température est imposée (cas de profil imposé, ou estimée dans le cas contraire).

Si le profil de température doit être calculé, l'algorithme de calcul, est :

- Calcul de l'aval vers l'amont en ayant estimé une température à l'aval en fonction des données sur l'environnement de la conduite.
- 15 • Calculs de l'amont vers l'aval effectués en estimant la pression amont et en effectuant les calculs thermodynamique, hydrodynamique et thermique. La résolution se fait par une méthode de calcul approché de type Newton à partir de la pression amont afin de retrouver la pression imposée à l'aval, comme schématisé sur la Fig. 3.

#### 20 IV) Détermination des états non-stationnaires

Les comportements instationnaires sont provoqués soit par des variations des conditions aux limites par rapport à un état initial stationnaire, soit encore par la géométrie irrégulière du terrain ou de l'installation qui provoque des écoulements instables que les spécialistes désignent par "terrain slugging" et "severe slugging".

Découplage de l'équation de transferts thermiques :

Comme la température varie beaucoup moins que la pression, la composition et les grandeurs hydrodynamiques, il est donc possible de résoudre les échanges thermiques de façon découplée du calcul de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Le système (quantité de mouvement, masse) peut être résolu par un schéma numérique connu écrit sous forme de volumes finis, explicite en temps par exemple, d'ordre 1 ou 2 en espace, tel que décrit par Roe P.L., 1980, "The use of Riemann problem in finite difference scheme", in Lectures notes of Physics 141.

10 L'équation des transferts thermiques est résolue par une méthode dite des caractéristiques. Le découplage entre la résolution thermique et hydrodynamique, a pour conséquence qu'à ce stade de la résolution, la température est connue.

On considère les variables conservatives suivantes :

$$\left. \begin{aligned} W_i &= \sum \rho_j R_j x_j^i \\ W_{Mvt} &= \sum \rho_j R_j V_j \end{aligned} \right\}$$

15 Les valeurs de ces grandeurs sont fournies par le schéma numérique de Roe ci-dessus défini.

Le système d'équations à résoudre est le suivant :

$$\left\{ \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} W_i &= \sum \rho_j R_j x_j^i \\ W_{Mvt} &= \sum \rho_j R_j V_j \end{aligned} \right\} \\ & \left( \begin{array}{l} x_j \\ \text{propriété de transport} \\ \text{propriétés thermiques} \end{array} \right) = \Gamma_{thermo} (P, T, c_1, \dots, -c_{n-p+1}) \\ & \Phi(V_M, X_j, \Gamma_{thermo}, dV_{ij}) = 0 \end{aligned} \right.$$



Résolution pour les bords internes du maillage :

- Le schéma numérique utilisé permet de découpler la résolution hydrodynamique de la résolution thermodynamique. Le problème se ramène à la détermination des grandeurs physiques à partir des grandeurs conservatives fournies par le schéma numérique par la méthode décrite ci-après.

La connaissance des masses de chacun des constituants ( $W_i$ ) permet de déterminer la concentration massique de chaque composant  $i$  :

$$c_i = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^n W_j}$$

Calcul de la pression et des propriétés thermodynamiques :

- On peut utiliser ici une méthode standard consistant à itérer sur la pression en faisant des appels à un "flash (P, T)" jusqu'à ce que la pression conduise à des masses de chacun des constituants égales à celles que le schéma numérique a fournies, suivant l'organigramme de la Fig.4.

- On peut noter qu'un gain en temps calcul important a été obtenu dans le cas d'un appel à un "flash (T, V)" intégré, en imposant des valeurs de températures et de volumes (cf. organigramme de la Fig.5); les itérations sont faites au sein de la thermodynamique et évitent des calculs redondants.

### Appel à la fonction hydrodynamique

- Connaissant la pression et toutes les caractéristiques du fluide, il est possible d'effectuer le calcul de la vitesse barycentrique  $V_M = \frac{W_{Mvt}}{\rho}$ . Un appel de la fonction hydrodynamique  $\Phi(V_M, X_j, \Gamma_{Thermo}, dV_{ij}) = 0$ , permet de calculer les vitesses des phases.

Il est intéressant de souligner que la résolution du modèle hydrodynamique est identique dans la partie transitoire et dans la partie stationnaire. Le diagramme

général de résolution permettant d'obtenir les grandeurs physiques à partir des grandeurs conservatives est montré à la Fig.6.

### Traitement des conditions aux limites

5 Dans le cas général, il y a  $n$  valeurs propres positives et une valeur propre négative:

$$\lambda_1 < 0 < \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots < \lambda_n$$

#### *Condition à la limite aval*

10 Dans le cas général, il y a donc une caractéristique entrante et  $n$  caractéristiques sortantes. La condition à la limite traduit l'information entrante. La pression est imposée

$$P - P_{aval} = 0$$

$N$  équations de compatibilité associées aux valeurs propres positives, traduisent l'information sortante :

15

$$\text{Pour } j = 1, n$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} W_i + \alpha_{Mvt} W_{Mvt} = A_j$$

La loi hydrodynamique et la loi thermodynamique doivent être également vérifiées.

La résolution du système non linéaire ainsi obtenu permet de déterminer les masses ( $W_i$ ) et la quantité de mouvement ( $W_{Mvt}$ ).

20 *Condition à la limite amont :*

Dans le cas général, il y a  $n$  caractéristiques entrantes et 1 caractéristique sortante. Les conditions à la limite, sur les débits imposés,  $q_1, q_2, \dots, q_n$  de chacun des composants, traduisent l'information entrante :

Les équations à vérifier sont donc les suivantes :

$$q_i - \left( \sum \rho_j R_j V_j x_j^i \right) \cdot S = 0 \quad \text{pour } j = 1 \text{ à } n$$

L'information sortante est traduite par l'équation de compatibilité associée à la valeur propre négative :

$$\sum \alpha_i W_i + \alpha_{Mvt} \cdot W_{Mvt} = \delta \quad (3)$$

- 5 La loi hydrodynamique et la loi thermodynamique doivent être également vérifiées.

La résolution du système non linéaire ainsi obtenu permet de déterminer les masses ( $W_i$ ) et la quantité de mouvement ( $W_{Mvt}$ ).

Remarque générale :

- 10 Les différentes étapes de résolution numérique tant sur les bords que sur les conditions aux limites font appel à des calculs de dérivées partielles. Par souci de robustesse, de précision et de gain en temps calcul, la plupart des dérivées sont calculées de façon analytique notamment les dérivées des grandeurs thermodynamiques.

## 15 Transferts thermiques transitoires

A ce stade de la résolution, la composition du mélange et la pression sont connues (résolution de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement).

Une méthode de caractéristiques (Fig.7) résout l'équation des transferts thermiques ; elle fournit la valeur de l'enthalpie massique du mélange.

- 20 L'appel à la loi thermodynamique permet de définir la température :

- La méthode standard consiste à faire des appels successifs à un "flash (P, T)" en faisant évoluer la température jusqu'à ce que l'enthalpie du mélange calculée soit identique à celle fournie par le schéma numérique.
  - Un gain de temps de calcul peut être obtenu en écrivant directement un
- 25 "flash (P, H)". Les itérations, dans ce cas, sont faites au sein même du modèle thermodynamique. Le modèle thermique fournit le terme d'échange

thermique  $Q_{int}$  qui est l'une des parties du terme source,  $Q_{enth}$  de l'équation de la chaleur.

La méthode selon l'invention qui permet donc de modéliser la variation de la composition d'un mélange à nombre réduit de composants dans l'espace et au cours  
5 du temps, a été validée expérimentalement sur des cas réels.

## REVENDICATIONS

- 1) Méthode pour constituer un modèle représentatif des écoulements permanents et transitoires dans des conduites d'un mélange polyphasique, comportant  
5 l'utilisation d'un modèle hydrodynamique de type à flux de dérive et d'un modèle thermodynamique intégré pour définir les propriétés des constituants et la résolution d'un ensemble d'équations de conservation de la masse, de conservation de la quantité de mouvement et de transfert d'énergie dans le mélange, caractérisée en ce que l'on forme le modèle en considérant que le mélange est sensiblement à l'équilibre  
10 à chaque instant et que la composition du mélange polyphasique est variable tout le long de la conduite, la masse de chaque constituant du mélange étant définie globalement par une équation de conservation de la masse sans considération de son état de phase.
- 2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comporte  
15 l'utilisation d'un schéma numérique explicite en temps de façon à faciliter la résolution des équations du modèle.
- 3) Méthode selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisée en ce qu'elle comporte l'assimilation de mélanges multi-composants à des mélanges constitués d'un nombre plus réduit de composants équivalents.
- 20 4) Méthode selon la revendication précédente, caractérisée en ce qu'elle comporte l'assimilation de mélanges multi-composants à des mélanges binaires équivalents.
- 5) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comporte une résolution des équations de transfert d'énergie découplée et  
25 celle concernant la conservation de la masse et la quantité de mouvement.
- 6) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comporte l'utilisation d'un module intégré et optimisé de détermination des paramètres thermodynamiques définissant l'équilibre des phases et les propriétés de transport du mélange.

1/3

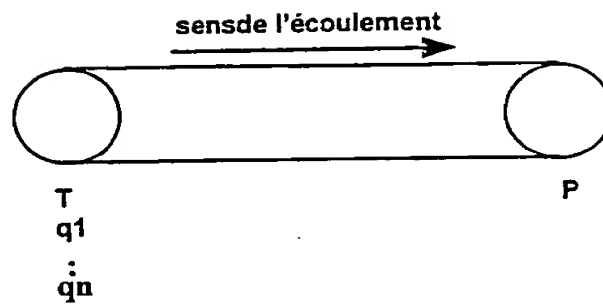


Fig. 1

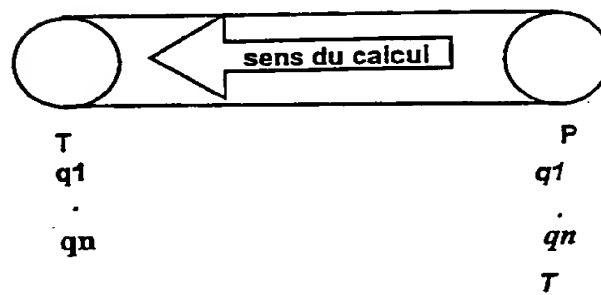


Fig. 2

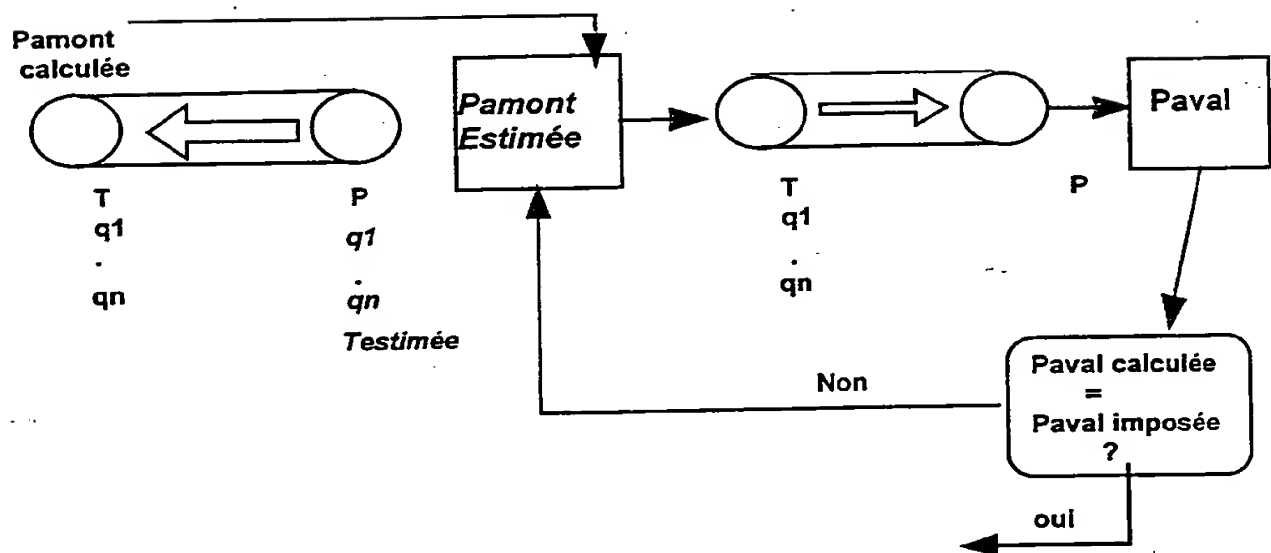


Fig.3

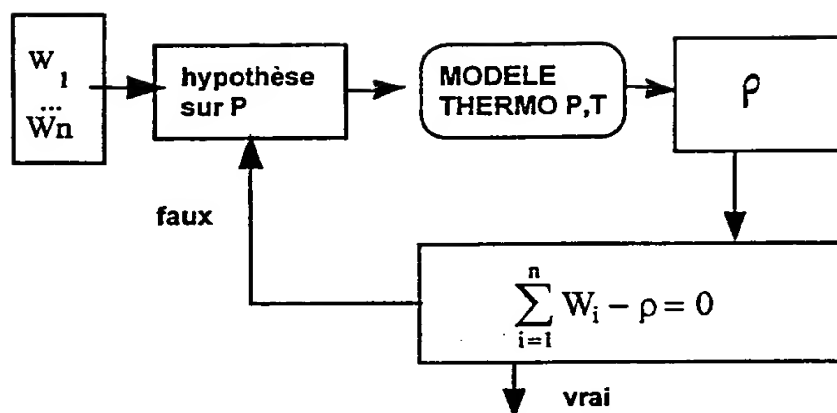


Fig. 4

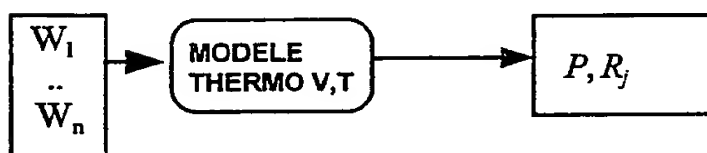


Fig.5

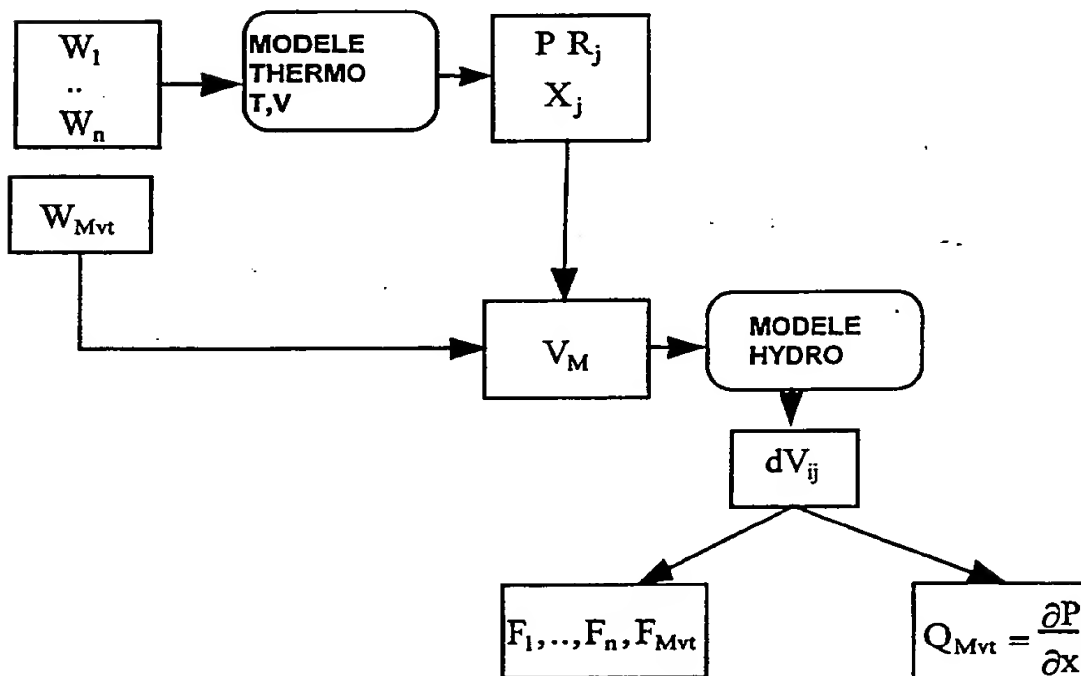


Fig.6

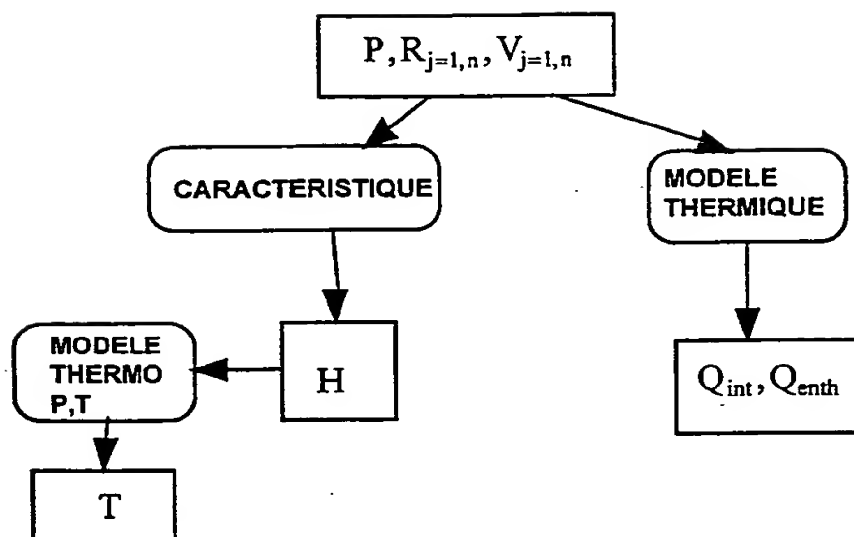


Fig. 7



REPUBLIQUE FRANÇAISE

2756044

N° d'enregistrement  
national

INSTITUT NATIONAL

RAPPORT DE RECHERCHE

PRELIMINAIRE

de la

PROPRIETE INDUSTRIELLE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FA 535732  
FR 9614124

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	SPE # 21755, 20 Mars 1991, pages 55-68, XP002035429 F.M. GUEHRIA, L.G. THOMPSON, A.C. REYNOLDS: "Compositional Reservoir Simulation, A New, Effecient, Fully Integrated Solution Technique for the Flow/Thermodynamic Equilibrium Equations " * le document en entier *	1
A,D	US 5 550 761 A (PAUCHON CHRISTIAN ET AL) 27 Août 1996 * le document en entier *	1
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)
		E21B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
17 Juillet 1997		Schouten, A
<p><b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b></p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un ... autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'un moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>		

1

EPO FORM 1503 (01.92) (POMC13)

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**